

Спеціальні та комбіновані методи

УДК 622.7.017 : 622.765

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук,

Г.В. ГУБІН, д-р техн. наук,

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук,

В.В. ТРОНЬ, канд. техн. наук

(Україна, Кривий Ріг, Державний ВНЗ "Криворізький національний університет),

В.О. РАВІНСЬКА

(Україна, Горішні Плавні, ВАТ "Полтавський ГЗК")

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛУ В СЕРЕДОВИЩІ ДЛЯ РОЗРОБКИ НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РУДОПІДГОТОВКИ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Залізорудна магнетитова сировина, що видобувається в Україні, характеризується складною текстурою, структурою, підвищеним вмістом шкідливих домішок, таких як діоксид кремнію, оксиди калію, натрію, магнію і сірки. При цьому вимоги до якості залізорудних концентратів, що надходять на подальшу металургійну переробку, зростають, оскільки висока якість магнетитових концентратів дозволяє значно скоротити витрати в металургійному виробництві. Магнетитові концентрати, що на світовому ринку користуються попитом, мають масову частку заліза 69-70%, діоксиду кремнію 2,5-3%, сірки 0,06-0,08% та інших шкідливих домішок не більше 0,3 % [1-3]. Концентрація сировини на світовому ринку вимагає негайних заходів щодо покращення якості залізорудних концентратів і одночасного зниження їх собівартості на українських гірничо-збагачувальних комбінатах. Зберегти своє місце на світовому ринку залізорудні гірничо-збагачувальні комбінати України можуть, лише вдосконаливши виробництво концентрату, який повинен містити 69-70% заліза, не більше 2,5% кремнезему, не більше 0,16% K_2O+Na_2O .

Стандартні рішення в сучасних умовах не дозволяють досягти високих техніко-економічних показників виробництва. Для переходу на новий технологічний рівень виробництва, що забезпечує якісні показники залізорудної сировини світового рівня, необхідні нові підходи.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В Україні сьогодні магнетитові кварцити переробляються з доопрацюванням концентратів флотацією на ПРАТ "Полтавський ГЗК" і "Інгuleцький ГЗК". Флотаційне доведення концентратів є найбільш досконалим рішенням проблеми видалення кремнезему і отримання чистих магнетитових концентратів, навіть до мономінеральних фракцій [5]. Попутно зменшується вміст лугів калію і натрію, що входять до складу мінералів породи. Приріст вмісту заліза при флотаційному доведенні чорнових магнітних концентратів коливається на фабриках від 2 до 9%. В результаті зворотньої флотації можна отримати "суперкон-

Збагачення корисних копалин, 2018. – Вип. 69(110)

центрати", які містять більше 70% заліза загального та менше 2% кремнезему. Вилучення заліза у концентрати залежить від вмісту магнетиту в рудах (18-35%) і змінюється від 65 до 85%. Якість флотаційних залізних концентратів залежить від мінерального складу руд.

Аналіз робіт [1–7] дозволив встановити основну причину забруднення концентратів. Її сутність полягає у погіршенні контрастності технологічних властивостей мінералів, що відбувається за рахунок магнітної флокуляції часток і утворення мікронних техногенних зростків. Механізм появи техногенних зростків пов'язаний в основному з наявністю на поверхні часток іонно-електричних і молекулярних полів. Найбільш простим, на перший погляд, вважається застосування механічної відтирки поверхонь мінеральних часток, однак це не завжди призводить до очікуваних результатів [7]. Утворення техногенних зростків нівелює різницю у властивостях поверхні рудних і нерудних зерен, змінює їх магнітну сприйнятливість, і, отже, ефективність різних сепараційних методів.

У ДВНЗ "Криворізький національний університет" вивчалися промпродукти збагачення ПАТ "ЦГЗК" і ПАТ "Північний ГЗК" [6]. Зразки піддавали інтенсивному ультразвуковому впливу (УЗВ). Отримані результати дозволили зробити висновок про те, що в різних класах продуктів магнітного збагачення змінювалася масова частка заліза загального після УЗВ. У класах крупності, в яких концентрувалися розкриті зерна мінералів ($-0,071$ мм), масова частка $Fe_{\text{заг}}$ підвищувалася на 2,7-4,1%. Водночас у шламових продуктах ($-0,02$ мм) – знижувалася на 14,7 і 7,2% для магнітних продуктів I і V стадій збагачення відповідно. Це свідчить про превалювання очищення часток від шламових покриттів над звільненням нерудних мінералів з магнітних флокул. Видалення мікронних техногенних утворень відбувається як з часток оксидів заліза, так і з часток кварцу і силікатів, результатом чого є оновлення поверхні часток і збільшення контрастності технологічних властивостей при магнітній сепарації і флотації.

Вплив ультразвукової кавітації на очищення часток у рідинах досліджено у праці [8]. Зазначено, що ультразвукова кавітація у рідкому середовищі викликає низку фізичних і хімічних ефектів. Коливання та колапс кавітаційних бульбашок, що рухаються при низьких частотах ультразвуку (20 кГц), можуть генерувати сильні зсувні сили, мікроструми та ударні хвилі. Вказано, що названі ефекти можуть бути використані для впливу на поверхневу активність твердих часток у рідині.

У праці [9] зазначено, що потужний ультразвук може бути використано при збагаченні вугілля для вилучення з вугілля сірки. Зазначено, що основними ефектами ультразвуку у рідкому середовищі є акустична кавітація та акустичні струми. Встановлено, що застосування ультразвукового впливу дозволяє досягти кращого очищення порівняно із хімічними методами.

Проведені у праці [10] дослідження закономірностей кавітаційних процесів у пульпі дозволили сформулювати метод визначення оптимальних параметрів ультразвукових коливань для підтримання режиму кавітації. Запропонована

аналітична залежність дозволяє розрахувати значення оптимальної частоти з урахуванням певного розміру газових бульбашок у пульпі.

Отже, збільшення якості магнетитових концентратів можливо за рахунок видалення з поверхні мінералів налиплих шламових часток та руйнування, так званих, техногенних зростків. Аналіз основних напрямів і підходів до цього питання показав, що застосування високоенергетичного ультразвуку певної інтенсивності для попередньої обробки залізорудної пульпи перед флотацією дозволить сформувати чисту поверхню мінеральних часток. Тим самим, внаслідок дезінтеграції рудних флокулоутворень, вихід високоякісного концентрату збільшиться. Тому удосконалення технології флотаційного доведення магнетитових концентратів пропонується за рахунок використання імпульсного магнітного поля спадної напруженості та високоенергетичного ультразвуку в кавітаційному режимі.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є моделювання впливу ультразвукового сигналу в середовищі для розробки нової технології рудопідготовки залізорудної сировини. Для досягнення поставленої мети в роботі виконано моделювання динамічних ефектів ультразвукових коливань на рудну пульпу.

Результати досліджень.

При виконанні роботи виконано моделювання і аналіз ефектів високоенергетичного ультразвуку. Для моделювання процесу поширення ультразвукового сигналу в текучому середовищі в умовах зміни швидкості поширення звуку і зміни щільності використовували метод k-space першого і другого порядку, заснований на системі лінійних рівнянь першого порядку [11].

Математичний опис кавітаційних процесів в неоднорідній гетерогенному середовищі пристосований до флотаційного процесу збагачення залізних руд детально розглянуто в роботі [10].

Для створення моделі впливу високоенергетичного ультразвуку на потік пульпи необхідно виконати розрахунок пристрою формування високоенергетичного ультразвуку з керованими параметрами.

Для двовимірної середовища без втрат, ці рівняння поширення ультразвукового сигналу в текучому середовищі в умовах зміни швидкості поширення звуку і зміни щільності використовують мають такий вигляд [11, 12]:

$$\rho(r) \frac{\partial u(r,t)}{\partial t} = -\nabla p(r,t),$$

$$\frac{1}{\rho(r)\alpha(r)^2} \frac{\partial p(r,t)}{\partial t} = -\nabla u(r,t), \quad (1)$$

де u – вектор коливання швидкості ультразвукової частки з компонентами u_x та u_y , p – флуктуації ультразвукового тиску, $\rho(r)$ – щільність середовища, $c(r)$ – швидкість звуку в середовищі, r вектор координат (x, y) .

Хвильове рівняння другого порядку, яке відповідає виразу (1) має такий вигляд [11, 12]:

$$\nabla \left(\frac{1}{\rho(r)} \nabla p(r, t) \right) - \frac{1}{\rho(r)c(r)^2} \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (2)$$

Розглянемо процедуру чисельного вирішення наведених вище рівнянь методом k-спасе. Для спрощення міркувань вважаємо, що швидкість звуку і щільність є постійними, тобто $\rho(r) = \rho_0$, $c(r) = c_0$. Загальні принципи, які знаходяться в основі методу k-спасе надано в роботі [13]. При цьому метод, який розглядається, може бути розширений до випадку гетерогенного середовища.

Для вузькосмугових сигналів, таких як ультразвукові імпульси, можуть бути отримані дуже точні просторові похідні, що отримані за допомогою перетворення Фур'є поля тиску [14].

Цей принцип знаходиться в основі псевдоспектральних методів, описаних зокрема в [15]. Просторові похідні з рівняння (1) обчислюються з використанням дискретного перетворення Фур'є і часової ітерації, що реалізуються з використанням методів Адамса-Башфорта і Адамса-Мультона четвертого порядку. Для випадку однорідної швидкості звуку і щільності рівняння (2) можна записати в просторово-частотній області наступним чином

$$\frac{\partial^2 \hat{p}(k, t)}{\partial t^2} = -c_0^2 k^2 \hat{p}(k, t), \quad (3)$$

де $\hat{p}(k, t)$ є двовимірне просторове перетворення Фур'є флуктуації ультразвукового тиску $p(r, t)$.

Дискретне уявлення лівій частини рівняння (2) отримано з використанням методу кінцевих різниць другого порядку. Отже, наближений псевдоспектральний метод описується виразом

$$\begin{aligned} \frac{p(r, t + \Delta t) - 2p(r, t) + p(r, t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} = \\ = c_0^2 F^{-1} \left(k^2 F(p(r, t)) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

де F – оператор двовимірного просторового перетворення Фур'є. У численних реалізаціях рівняння (3) просторові похідні від правої частини рівняння (2) точно представлені з використанням дискретного перетворення Фур'є.

Але розглянуті псевдоспектральні методи [11, 14, 15], як правило, використовують методи часового інтегрування вищого порядку, щоб зменшити помилки дисперсії. Проте, для однорідного середовища часова ітерація може бути виконана точно, тобто без будь-якої дисперсії з використанням методу k - t простору [13].

$$\begin{aligned} \frac{\hat{p}(k, t + \Delta t) - 2\hat{p}(k, t) + \hat{p}(k, t - \Delta t)}{(\Delta t)^2 \sin(c_0 \Delta t k / 2)^2 / (c_0 \Delta t k / 2)^2} = \\ = -(c_0 k)^2 \hat{p}(k, t), \end{aligned} \quad (5)$$

Метод часової ітерації математично еквівалентний методу, спочатку представлено у роботі [11].

Як показано в роботі [13], часова точність даного методу впливає з точного дискретного представлення диференціального рівняння гармонічного осцилятора, описаного в роботі [16]. Часова ітерація може бути виконана в просторово-частотній області, як показано в роботі [13] з використанням узагальненої форми рівняння (4). Також, еквівалентний ітераційний метод може бути отримано за допомогою зворотного просторового перетворення Фур'є рівняння (4). Отримана ітераційна формула має вигляд [11]

$$\begin{aligned} \frac{p(r, t + \Delta t) - 2p(r, t) + p(r, t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} = \\ = c_0^2 F^{-1} \left(k^2 \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r, t)) \right), \end{aligned} \quad (6)$$

До правої частини рівняння (5) застосовується k -space оператор другого порядку, який має вигляд:

$$\begin{aligned} \left(\nabla^{(c_0 \Delta t)} \right)^2 p(r, t) \equiv \\ \equiv -F^{-1} \left(k^2 \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)^2}{(c_0 \Delta t k / 2)^2} F(p(r, t)) \right), \end{aligned} \quad (7)$$

де $(c_0 \Delta t)$ – верхній індекс позначає, що використовуються оператори є стандартним оператором градієнта, але при цьому є функціями параметра $(c_0 \Delta t)$.

Форма рівняння (5) говорить про те, що метод k -space другого порядку можна розглядати як модифікований метод кінцевих різниць, в якому просторовий лапласіан замінюється k -space оператором. Проте, k -space оператор в рів-

нянні (6) включає в себе не тільки спектральну оцінку лапласіан, а й елемент часової корекції, пов'язаний з k - t просторовим ітератором рівняння (4).

Для застосування методу k -space до системи рівнянь першого порядку, що описують поширення хвиль, може бути використаний k -space оператор другого порядку. Для цього оператор другого порядку розділяють на частини, які пов'язані з кожним просторовим напрямком. Для двовимірного випадку ця процедура виконується в такий спосіб

$$\begin{aligned}\frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ x} &\equiv F^{-1} \left(i k_x e^{i k_x \Delta x / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right); \\ \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ y} &\equiv F^{-1} \left(i k_y e^{i k_y \Delta y / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right); \\ \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^- x} &\equiv F^{-1} \left(i k_x e^{i k_x \Delta x / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right); \\ \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^- y} &\equiv F^{-1} \left(i k_y e^{i k_y \Delta y / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right),\end{aligned}\tag{8}$$

так що

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ x} \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^- x} + \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ y} \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^- y} \right) p(r,t) = \\ = \left(\nabla^2 (c_0 \Delta t) \right)^2 p(r,t).\end{aligned}\tag{9}$$

Просторово-частотні компоненти k_x і k_y визначені так, що $k^2 = k_x^2 + k_y^2$.

Використання операторів рівняння (7) у рівнянні (1) дозволяє сформувати k -space метод першого порядку еквівалентний рівнянням (5). Застосування експоненціальних коефіцієнтів з рівняння (7) вимагає оцінки швидкостей ультразвукової хвилі u_x і u_y по точках сітки в с інтервалами $\Delta x/2$ і $\Delta y/2$ відповідно. Отриманий алгоритм має вигляд

$$\begin{aligned}\frac{u_x(r_1, t^+) - u_x(r_1, t^-)}{\Delta t} &= \frac{1}{\rho(r_1)} \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ x}; \\ \frac{u_y(r_2, t^+) - u_y(r_2, t^-)}{\Delta t} &= \frac{1}{\rho(r_2)} \frac{\partial p(r,t)}{\partial (c_0 \Delta t)^+ y};\end{aligned}$$

$$\frac{\rho(r, t + \Delta t) - \rho(r, t)}{\Delta t} = -\rho(r) c(r)^2 \left(\frac{\partial u_x(r_1, t^+)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^+} x} + \frac{\partial u_y(r_2, t^+)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^-} y} \right), \quad (10)$$

де

$$r_1 \equiv (x + \Delta x / 2, y), \quad r_2 \equiv (x, y + \Delta y / 2),$$

$$t^+ \equiv t + \Delta t / 2, \quad t^- \equiv t - \Delta t / 2. \quad (11)$$

У рівнянні (10), замість коефіцієнтів c_0 і ρ_0 використано просторово змінювані значення швидкості звуку та густини $c(r)$ і $\rho(r)$. Просторовий розподіл у рівнянні (9) неявно включається у просторові похідні розглянутих операторів. Наприклад, оператори $\partial / \partial^{(c_0 \Delta t)^+} x$ і $\partial / \partial^{(c_0 \Delta t)^-} x$, що визначаються за формулою (8), відповідають похідним, розрахованим після просторових зсувів $\Delta x / 2$ та $-\Delta x / 2$ відповідно.

Характер зміни концентрації часток і розподілення їх за розмірами в полі високоенергетичного ультразвуку залежить від щільності самих часток, частоти та інтенсивності впливає випромінювання.

Оцінимо вплив радіаційного тиску ультразвуку на зміну концентрації часток радіуса r . Нехай в позитивному напрямку осі x тече пульпа зі швидкістю V . Позначимо через $n_r(Z, t)$ концентрацію часток радіуса r на глибині Z в момент часу t . З урахуванням вищевикладеного можна записати

$$\frac{\partial n_r(Z, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial Z} [V_r(Z, t) n_r(Z, t)]. \quad (12)$$

У цьому рівнянні $V_r(Z, t)$ – швидкість зсуву частки радіуса r з координатою Z в ультразвуковому полі. Швидкість спрямована уздовж осі z , тобто перпендикулярна потоку пульпи. У загальному випадку вона залежить від часу t , так як в результаті дії ультразвуку змінюється концентрація часток, а це призводить до зміни інтенсивності ультразвуку, що, в кінцевому рахунку, позначається на швидкості зсуву часток. Однак це значно ускладнює рішення рівняння (11), тому будемо припускати, що швидкість залежить тільки від координати Z .

Вважаючи, що інтенсивність ультразвукової хвилі I змінюється за експоненціальним законом (початкове значення), коефіцієнт її загасання α залежить від частоти звуку ν_0 і з урахуванням аналізу, виконаного в роботі [17], концентрація часток $n_r(Z, t)$ визначається за формулою

$$n_r(Z, t) = n_0 \frac{e^{\alpha Z}}{e^{\alpha Z} - \alpha \beta t} \mathcal{S}(e^{\alpha Z} - 1 - \alpha \beta t), \quad (13)$$

де $n_r(Z, 0) = n_0$, $n_r(0, t) = 0$ – початкові і граничні умови;

$$\mathfrak{X}(X) = \begin{cases} 0, & X < 0; \\ 1, & X \geq 0; \end{cases}$$

$$\beta = \frac{2r(kr)^4}{27\eta c} I_0 \left(a_1^2 + a_1 a_2 + \frac{3}{4} a_2^2 \right);$$

$$a_1 = 1 - \frac{rc^2}{\rho c^2}; \quad a_2 = 2 \frac{\rho - \rho}{2\rho + \rho};$$

де ρ_T , c_T – щільність частки і швидкість ультразвуку в матеріалі частки; ρ , c – щільність досліджуваної середовища і швидкість ультразвуку в ній.

При збільшенні інтенсивності високоенергетичного ультразвуку від нуля до певного значення і постійної швидкості потоку пульпи в зону вимірювань можуть бути зміщені всі або тільки окремі класи крупності подрібненого матеріалу [17].

$$F(r) = \left(\int_0^{r_1} f(r) r^3 dr + \int_{r_1}^{r_2} f(r) r^3 dr + \dots + \int_{r_{m-1}}^{r_m} f(r) r^3 dr \right) / \int_0^{r_m} f(r) r^3 dr. \quad (14)$$

Потужність високоенергетичного ультразвуку, що дозволяє здійснювати прогнозоване зміщення часток подрібненої руди певної маси в потоці пульпи, розраховано за допомогою пакета HIFU Simulator v1.2 [18].

Таким чином, моделювання і аналіз динамічних ефектів високоенергетичного ультразвуку при впливі на рудну пульпу дозволили розробити метод змінення траєкторії руху часток певного класу крупності.

У роботі [19] досліджено вимушені коливання монополярних доменних границь під дією ультразвукових хвиль, що поширюються уздовж неї. Дане явище пояснюється тим, що ультразвук викликає в частках заліза змінні механічні напруження, що призводить до збільшення величини магнітопружної енергії U_d , яка у загальному випадку визначається з виразу [20]:

$$U_d = -\sigma \cdot \lambda, \quad (15)$$

де λ – магнітострикція, σ – напруження. Відповідно до закону анізотропії М.С. Акулова вираз для U_d приймає такий вигляд:

$$U_d = -\sigma \cdot \left(a_1 \sum_{i=1,2,3} \left(\mathfrak{S}_i^2 \beta_i^2 - \frac{1}{3} \right) + a_2 \sum_{i \neq j} (S_i S_j \beta_i \beta_j) \right), \quad (16)$$

Для збереження умови:

$$\frac{\partial (U_\kappa + U_d + U_\mu)}{\partial \alpha} = 0, \quad (17)$$

де U_k – енергія магнітної анізотропії кристала; U_H – енергія зовнішнього магнітного поля.

Відповідно до виразів (14)–(17), якщо зміниться енергія U_H , то і намагніченість часток збільшиться.

Нижче розглянута конструкція каналу впливу високоенергетичних ультразвукових коливань на потік пульпи, виконаного за технологією ультразвукової фазованої решітки.

Ультразвукова фазована решітка розглядається як множина точкових джерел ультразвуку, розташованих на однаковій відстані (d) один від одного. При розробці конструкції досліджено вплив відстані між елементами, довжини хвилі і кількості елементів на керованість і ефективність ультразвукового випромінювання [17].

Тиск ультразвукового поля визначено з використанням принципу Гюйгенса за формулою [21]

$$p(r, \theta, t) = \frac{p_0 r_0}{r} \frac{\sin(\chi N)}{\sin(\chi)} e^{-j\chi(N-1)} e^{j(\omega t - kr)},$$

$$\chi = \frac{\omega \Delta \tau - kd \sin \theta}{2}, \quad (18)$$

де r_0 – нескінченно малий радіус пульсуючих точкових джерел ультразвукового випромінювання; p_0 – амплітуда тиску точкових джерел ультразвукового випромінювання; k – хвильове число; ω – кутова частота; N – кількість точкових джерел ультразвукового випромінювання; j – уявна одиниця.

Необхідний час затримки між сусідніми джерелами визначається направленням ультразвукового випромінювання під кутом θ_s та задається співвідношенням [21]

$$\Delta \tau = \frac{d \sin \theta_s}{c}, \quad (19)$$

де c – швидкість звуку в середовищі поширення (еталонної рідини – воді і залізородної пульпи відповідно).

Спрямованість ультразвукового випромінювання, виходячи з виразу (8), тоді буде визначена у вигляді:

$$H(\theta) = \frac{\left| \sin \left(\frac{\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} \right) \right|}{N \left| \sin \left(\frac{\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} \right) \right|}. \quad (20)$$

Оптимальні параметри ультразвукової фазованої решітки обрані на основі показників, що характеризують діаграму спрямованості ультразвукової фазованої решітки (рис. 2).

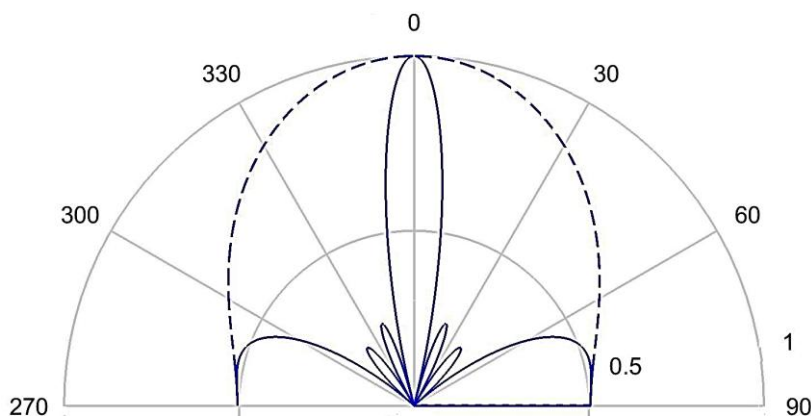


Рис. 2. Діаграма спрямованості ультразвукової фазованої решітки:
— — сумарна; - - - - точкового елемента

Показник ширини (загостреності) головної пелюстки діаграми з урахуванням (19) визначається за формулою

$$q = \frac{1}{\pi} \left(\sin^{-1} \left(\sin \theta_s + \frac{\lambda}{Nd} \right) - \sin^{-1} \left(\sin \theta_s - \frac{\lambda}{Nd} \right) \right). \quad (21)$$

В даному випадку, кращій спрямованості відповідає менше значення показника q . Слід зазначити, що в разі, коли значення виразу λ/Nd наближається до нуля, тоді значення q також прямує до нуля. Таким чином, кращої спрямованості можна досягти, застосовуючи більшу кількість точкових випромінюючих елементів або збільшуючи відстань між цими елементами.

Виходячи з виразу (21), що описує показник ширини головної пелюстки діаграми спрямованості можна зробити висновок, що збільшення кількості елементів ультразвукової фазованої решітки підвищує ефективність. Однак, результати дослідження [21] показують, що значення показника q різко зменшується при варіюванні кількості п'єзоелементів в фазованій решітці до 8 штук. А при кількості елементів, що перевищує 32, збільшення їх числа не приносить істотного поліпшення показника q . З урахуванням цієї обставини, оптимальною кількістю елементів, з точки зору покращення показника направленості фазованої решітки та вартості її виготовлення, є 16 [17, 21].

Відстань між елементами також є істотним показником, який впливає на показник спрямованості q випромінювання ультразвукової фазованої решітки. В роботі [21] показано, що краще значенням показника спрямованості відповідає більшу відстань між елементами фазованої решітки. Однак слід зазначити, що поряд зі змінням показника спрямованості q , також збільшуються бічні пелюстки діаграми спрямованості. Це підтверджують, представлені на рис. 9

результати розрахунку діаграм спрямованості ультразвукової фазованої решітки з 16 елементами (4×4) при зміні відстані між елементами від 0,4 мм до 0,7 мм з кроком 0,1 мм.

Отже, необхідно знайти компромісне значення відстані між елементами фазованої решітки. Дане значення, з одного боку, забезпечує оптимальний рівень спрямованості випромінювання, а з іншого – забезпечує зменшення бічних пелюсток діаграми спрямованості. З рівняння (20) за умови $H(\pi/2)=1$ визначається відстань між елементами фазованої решітки

$$d_{cr} = \frac{1}{1 + \sin \theta_s}. \quad (22)$$

В результаті моделювання та розрахунку, отримано оптимальне значення відстані між елементами ультразвукової фазованої решітки, яке дорівнює $d_{cr} = 0,45$ мм.

Тривимірне представлення діаграми спрямованості даної ультразвукової фазованої решітки наведено на рис. 3.

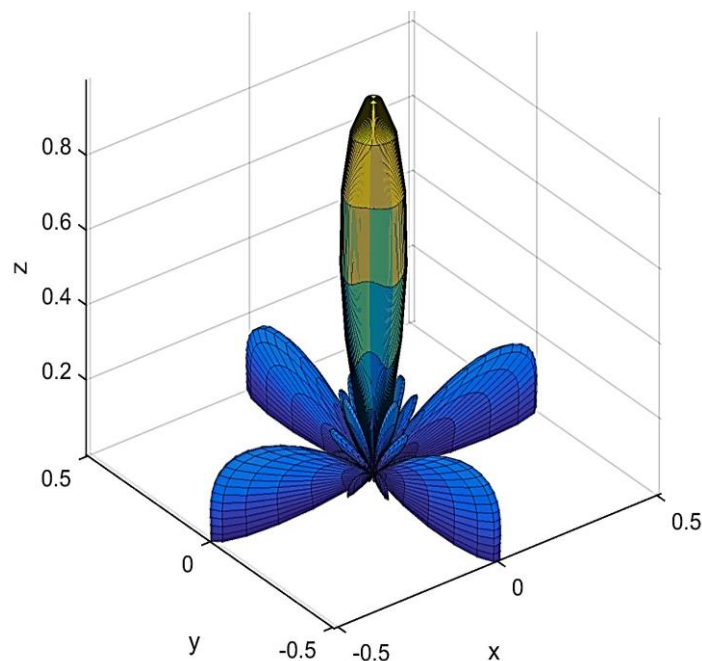


Рис. 3. Діаграма спрямованості ультразвукової фазованої решітки при відстані між елементами $d_{cr}=0,45$ мм

Таким чином, застосування попередньої обробки залізорудної пульпи за допомогою високоенергетичного ультразвуку є перспективним напрямком підвищення ефективності процесу флотаційного доведення залізорудного концентрату шляхом очищення часток корисного компонента від шламу. Даний підхід може бути Доведемо, що ефективність ультразвукової обробки пов'язана з оно-

вленням поверхонь часток, що призводить до збільшення контрастності магнітних і флотаційних властивостей мінералів.

Для підтвердження результатів моделювання було відібрано проби продуктів з технологічних потоків магнітно-флотаційного збагачення тонко та вельми тонковкраплених магнетитових кварцитів Кременчуцького залізорудного району. Проби оброблялись з використанням імпульсного магнітного поля спадної напруженості та високоенергетичного ультразвуку в кавітаційному режимі, модульованого високочастотними імпульсами. Як показав мінералогічний аналіз, поверхні мінеральних часток в розвантаженні млина найменш забруднені шлаками в порівнянні з іншими продуктами. Однак, розділення в лабораторній експериментальній установці продукту без попередньої ультразвукової обробки не дозволило значно покращати якість матеріалу – масова частка $Fe_{\text{заг}}$ в очищеному продукті підвищилася на 0,41%. Тоді, як після ультразвукової обробки протягом 60 с і інтенсивністю впливу $1,62 \text{ Вт/см}^2$ якість очищеного продукту підвищився додатково на 0,4-0,5% при одночасному підвищенні вилучення магнетиту – на 1,1%. Ультразвуковий вплив створив сприятливі умови для розділення навіть порівняно "чистих" по поверхневому забрудненню дрібнодисперсних часток. Одночасно з підвищенням якості очищеного продукту збільшився його вихід за рахунок селективної магнітної флокуляції дрібнодисперсних очищених від нерудних шлаків часток магнетиту. Ефективність очищення продукту, а саме зливу вертикального млина від нерудних мінералів, розрахована за критерієм Хенкока-Луйкена, при застосуванні ультразвукової обробки підвищилася на 2,2-2,5% або в 1,8-2,1 рази.

Високі значення ультразвукових впливів змінюють кінематику коливального руху мінеральних частини, збільшується ймовірність їх зіткнення між собою і газовими бульбашками. Відбувається зниження поверхневої енергії часток і коагуляція. Як показали результати експериментів, при високій інтенсивності ультразвукового впливу або при тривалому впливі на пульпу вихід очищеного продукту зростає. Це відбувається за рахунок збільшення вмісту в ньому сфлукуюваних нерудних і рудних мінералів, а якість його знижується. Так, наприклад, зі збільшенням ультразвукової обробки з 60 с до 240 с, кількість засвоєної пульпою ультразвукової потужності підвищується з 3,5 Вт до 11,5-12 Вт, а якість продукту, який очищується, знижується. Відбувається дисипація ультразвукової енергії в рідкій фазі пульпи, що є причиною різкого зниження ефективності обробки.

Аналіз результатів ультразвукової обробки продукту живлення зворотної флотації магнетиту показав наступне. Зі збільшенням інтенсивності ультразвукового впливу якість відмитого продукту підвищується на 0,3–0,48 % до досягнення максимуму. При подальшому підвищенні інтенсивності якісні показники знижуються незначно на відміну від попереднього експерименту, де спостерігалось різке зниження якості. Це пояснюється тим, що продукт характеризується значно меншим вмістом великих нерудних зерен. Вихід продукту після ультразвукової, обробки підвищується при інтенсивності $1,2-1,9 \text{ Вт/см}^2$ і часу обро-

бки 60-120 с. При більшій інтенсивності обробки вихід знижується. Тривалість обробки 240 с призводить до зменшення виходу відмитого продукту в усьому інтервалі інтенсивності впливу. Оптимальними параметрами обробки за показником вилучення $Fe_{\text{заг}}$ в відмитому продукті при очищенні мінеральних часток є інтенсивність $1,2 \text{ Вт/см}^2$ і час обробки не більше 60 сек. При тому вихід очищеного продукту підвищується на 0,8 %, а його якість на 0,9%. Ефективність відмивання за показником Хенкока-Луйкіна підвищується із застосуванням ультразвукової обробки з 1,7 до 3,1% тобто в 1,8 рази.

Після ультразвукової обробки флотоконцентрату його якість практично не змінюється, а при тривалій обробці навіть незначно знижується. Це пов'язано з тим, що всі мінеральні зерна інтенсивно очистилися в процесі ультразвукової обробки, проте потрапляючи в слабе магнітне поле експериментальної установки в рідкій фазі ці зерна утворюють магнітні флокули, до складу яких входять бідні залізовмісні силікати. В цьому випадку якість кінцевого концентрату не росте, але вихід збільшується.

Ультразвуковий вплив знижує масову частку нерудних оксидів в очищених продуктах проб флотаційного доведення. В інтервалі інтенсивності ультразвукового впливу від $1,2$ до $2,2 \text{ Вт/см}^2$ має місце значне зниження концентрації оксидів в очищеному продукті. Концентрація оксидів K_2O , Na_2O , MgO , Al_2O_3 в очищеному продукті знижується в 1,2-3 рази. Подальше збільшення інтенсивності призводить до зниження ефективності ультразвукового впливу.

Висновки та напрямки подальших досліджень.

Стандартні рішення в сучасних умовах не дозволяють досягти високих техніко-економічних показників виробництва. Для переходу на новий технологічний рівень виробництва, що забезпечує якісні показники залізорудної сировини світового рівня, у результаті виконаних досліджень одержано наступне.

1. На підставі результатів моделювання і аналізу динамічних ефектів ультразвукових коливань при впливі на рудну пульпу визначено оптимальне значення відстані між елементами фазованої решітки, що є джерелом ультразвукових коливань. Дане значення ($d_{cr}=0,45 \text{ мм}$) з одного боку забезпечує оптимальний рівень спрямованості випромінювання, а з іншого – забезпечує зменшення бічних пелюсток діаграми спрямованості

2. Встановлено, що застосування попередньої обробки залізорудної пульпи за допомогою високоенергетичного ультразвуку дозволяє підвищити ефективність очищення рудної сировини, Зокрема ефективність очищення від нерудних мінералів зливу вертикального млина за критерієм Хенкока-Луйкена підвищилась на 2,2-2,5%.

3. Визначено оптимальні параметри обробки за показником вилучення заліза загального у очищеному продукті. При очищенні мінеральних часток інтенсивність має становити $1,2 \text{ Вт/см}^2$, час обробки не більше 60 сек. У такому випадку вихід очищеного продукту підвищується на 0,8%, а його якість – на 0,9%.

Ефективність очищення за показником Хенкока-Луйкіна підвищується з 1,7 до 3,1%.

4. Встановлено, що ультразвуковий вплив знижує масову частку нерудних оксидів в очищених продуктах проб флотаційного доведення. У інтервалі інтенсивності ультразвукового впливу від 1,2 до 2,2 Вт/см² має місце значне зниження концентрації оксидів K₂O, Na₂O, MgO, Al₂O₃ у очищеному продукті у 1,2-3 рази. Водночас, подальше збільшення інтенсивності призводить до зниження ефективності ультразвукового впливу.

Список літератури

1. Сентемова, В.А. Флотация в схемах обогащения магнетитовых руд [Текст] / В.А. Сентемова // Обогащение руд. – 2007. – № 2. – С. 18-22.
2. Олійник, Т.А. Розробка технологій очищення залізовмісних концентратів від шкідливих домішок [Текст] / Т.А. Олійник, Е.В. Часова, Л.В. Скляр, Н.В. Кушнірук, М.О. Олійник, А.Ю. Скляр // Збагачення корисних копалин. – 2016. – Вип. 62 (103). – С. 34-44.
3. Гончаров, С.А. Повышение эффективности обогатительных технологий путем воздействия высокочастотного ультразвука на перерабатываемое сырье [Текст] / С. А. Гончаров // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – 2009. – Вип. 23. – С. 236-239.
4. Гзогян, Т. Н. Теоретические и экспериментальные исследования получения высококачественных концентратов [Текст] / Т. Н. Гзогян // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – №4. – С. 389-393.
5. Олійник, Т.А. Олійник М.О., Скляр Л.В., Скляр А.Ю. Особливості збагачення залізних руд [Текст] // Збагачення корисних копалин. – 2017. – Вип. 67(108). – С. 88-101.
6. Губин, Г. Г. Обобщение и анализ возможности использования ультразвуковых колебаний при переработке полезных ископаемых [Текст] / Г. Г. Губин, Т. П. Ярош, Л. В. Скляр // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2016. – Вип. 62(103). – С. 132–143.
7. Пилов П.И. Повышение качества магнетитовых концентратов путем их механической обработки // Горный журнал. – 1999. – № 6. – С. 30-32.
8. Yusof, N. S. M. Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications / N. S. M. Yusof, B. Babgi, Y. Alghamdi, M. Aksu, J. Madhavan, M. Ashokkumar // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Volume 29. – P. 568-576.
9. Ambedkar, B. Ultrasonic coal-wash for de-sulfurization / B. Ambedkar, R. Nagarajan, S. Jayanti // Ultrasonics Sonochemistry. – 2011. – Volume 18, Issue 3. – P. 718-726.
10. Morkun, V. Optimization of high-energy ultrasound source parameters for cavitation disintegration of ore floccules before floatation [Text] / V. Morkun, V. Tron, V. Ravinskaia // IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering. – 2017. – P. 96-99.
11. Tabei, M. A k-space method for coupled first-order acoustic propagation equations [Text] / M. Tabei, T. D. Mast, R. C. Waag // Acoustical Society of America. – 2002. – 111 (1), Pt. 1. – P. 53-63.
12. Pierce, D. Acoustics: an introduction to its physical principles and applications [Text] / D. Pierce. – NY: Acoustical Society of America, 1989. – 678 p.
13. Mast, T.D., A k-space method for large-scale models of wave propagation in tissue [Text] / T.D. Mast, L. P. Souriau, D.-L. Liu, M. Tabei, A.I. Nachman, R.C. Waag // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. – 2001. – Vol. 48. – P. 341-354.
14. Fornberg, B., A practical guide to pseudospectral methods [Text] / B. Fornberg. – Cambridge: Cambridge University Press, 1996. – 231 p.

15. Wojcik, G., Pseudospectral methods for large-scale bioacoustic models / Wojcik, G., Fornberg, B., Waag, R., L. Carcione, J. Mould, L. Nikodym, T. Driscoll // Proc. IEEE Ultrason. Symp. – 1997. – Vol. 2. – P. 1501-1506.
16. Mickens, R.A., Nonstandard finite difference models of differential equations / R. A. Mickens. – Singapore: World Scientific, 1994. – 250 p.
17. Morkun, V., The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No 6. – P. 8-11.
18. Soneson, J. HIFU Simulator v1.2 [Electronic resource] / J. Soneson. – URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30886-high-intensity-focused-ultrasound-simulator>.
19. Власко-Власов, В. К. Коливання монополярних доменних стінок в поле ультразвукової хвилі [Текст] / В.К. Власко-Власов, О.А. Тихомиров // Фізика твердого тіла. – 1991. – Том 33. №12. – С. 3498-3501.
20. Киренский, Л.В., Вплив ультразвуку на магнітні властивості феромагнетиків при різних температурах [Текст] / Л.В. Киренский, А.І. Дрокин, В.С. Черкашин // Магнітна структура феромагнетиків. – 1960. – С. 165-173.
21. Wooh, S.C. Optimization of ultrasonic phased arrays [Text] / S.C. Wooh, Y. Shi // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 1998. – Vol. 17. – P. 883-890.

© Моркун В.С., Губін Г. В., Олійник Т.А., Тронь В.В., Равінська В.О., 2018

*Надійшла до редколегії 18.03.2018 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*